2А

УДК 629.735.083.06

Аль-Аммори Али
Национальный транспортный университет, г. Киев, Украина

Методика оценки информационного резервирования систем сигнализации опасных полетных ситуаций

В статье предлагается обобщенная методика выбора и обоснования оптимальной структуры параллельного информационного резервирования систем сигнализации опасных полетных ситуаций по принципу мажоритарной логики. Получены математические зависимости одновременного учета и минимизации вероятностей ложных тревог и не обнаружения контролируемых событий на борту воздушных судов.

Введение

Характерной чертой современного уровня развития авионики является разработка и широкое внедрение высоконадежных информационно-управляющих систем (ИУС), выполняющих функции сбора и обработки информации о техническом состоянии функциональных систем воздушных судов (ВС).

К числу информационных систем авионики оборудования, оказывающих существенное влияние на безопасность полета и эффективность выполнения процесса полета, относятся системы сигнализации и пожаротушения для своевременного обнаружения пожара и выдачи экипажу достоверной информации об его наличии.

Разрешение проблемы обеспечения эффективности, надежности и безопасности полетов ИУС в плане повышения достоверности информации о процессе полета и о техническом состоянии авионики ВС предполагает введение информационного резервирования.

Информационное резервирование – это способ обеспечения эффективности информационно-управляющих систем за счет введения резервирования по информационным признакам этих систем.

Известно, что как точность, так и достоверность контролируемой информации можно существенно повысить путем ее статистической обработки, если подавать на вычислительные управляемые системы информацию одновременно от нескольких источников информации, подключаемых параллельно. Такие способы ввода информации называют параллельным информационным резервированием, они в принципе позволяют существенно повысить точность и достоверность контролируемой информации, поступаемой от некачественных и технически ненадежных источников информации.

Параллельное информационное резервирование – это способ обеспечения эффективности информационно-управляющих систем, когда данные поступают от нескольких источников и принимается решение о наличии контролируемого параметра по мажоритарному принципу «m из n», если m из n источников подтверждают факт появления контролируемого признака.

Цель работы: разработка обобщенной методики выбора и обоснования оптимальной структуры параллельного информационного резервирования систем сигнализации об опасных полетных ситуациях.

Объект исследования: информационно-управляющие системы сигнализации, процессы распознавания, локализации и ликвидации опасных полетных ситуаций.

Информация от реального датчика всегда поступает с определенной степенью достоверности, которую можно охарактеризовать тремя вероятностными состояниями [1-5]:

a – вероятность правильного обнаружения события, состоящего в наличии либо отсутствии пожара или опасных полетных ситуаций;

b – вероятность ложной тревоги;

d – вероятность необнаружения пожара.

Одним из основных методов обеспечения требуемых надежностных характеристик систем сигнализации о пожаре (ССП) в плане повышения достоверности передаваемых сообщений является введение информационного резервирования. Поскольку существуют различные способы информационного резервирования, то для сравнения резервированных систем сигнализации о пожаре в качестве основного критерия обычно принимается достоверность обнаружения событий, представляющая собой сумму вероятности обнаружения системой пожара, когда пожар имеет место в действительности, и вероятности необнаружения системой пожара, когда пожара нет. Однако статистика летной и технической эксплуатации систем сигнализации о пожаре [6] свидетельствует о значительном удельном объеме среди всего числа функциональных отказов таких систем, так называемых ложных тревог. В связи с этим, наряду с достоверностью обнаружения событий, критерием качества системы и принимается вероятность ложной тревоги, то есть вероятность сигнализации о пожаре, когда в действительности его нет.

Работу информационно-резервированной системы сигнализации о пожаре силовых установок ВС, состоящую из реальных датчиков, можно описать с помощью графа, представленного на рис. 1.

При этом систему пожарной сигнализации можно представить как бинарный канал связи с помехами [7], [8], когда на передающей стороне, где расположена информационно-резервированная система датчиков, может иметь место явление пожара (событие A) с вероятностью $p(A) = p$ или отсутствие такового (событие B) с вероятностью $p(B) = q = 1 - p$.

Полученная с помощью системы из n датчиков информация о наличии или отсутствии пожара передается на принимающую сторону – систему индикации.

В системе пожарной сигнализации с резервированными датчиками вероятности p_1, p_2, p_3 соответственно вероятность правильного обнаружения, ложной тревоги и необнаружения события функционально зависит от числа датчиков n и от их вероятностных характеристик a, b, d, т.е.

$$\left.\begin{aligned} p_1 &= f_1(n,a,b,d) \\ p_2 &= f_2(n,a,b,d) \\ p_3 &= f_3(n,a,b,d) \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

причем $p_1 + p_2 + p_3 = 1$.

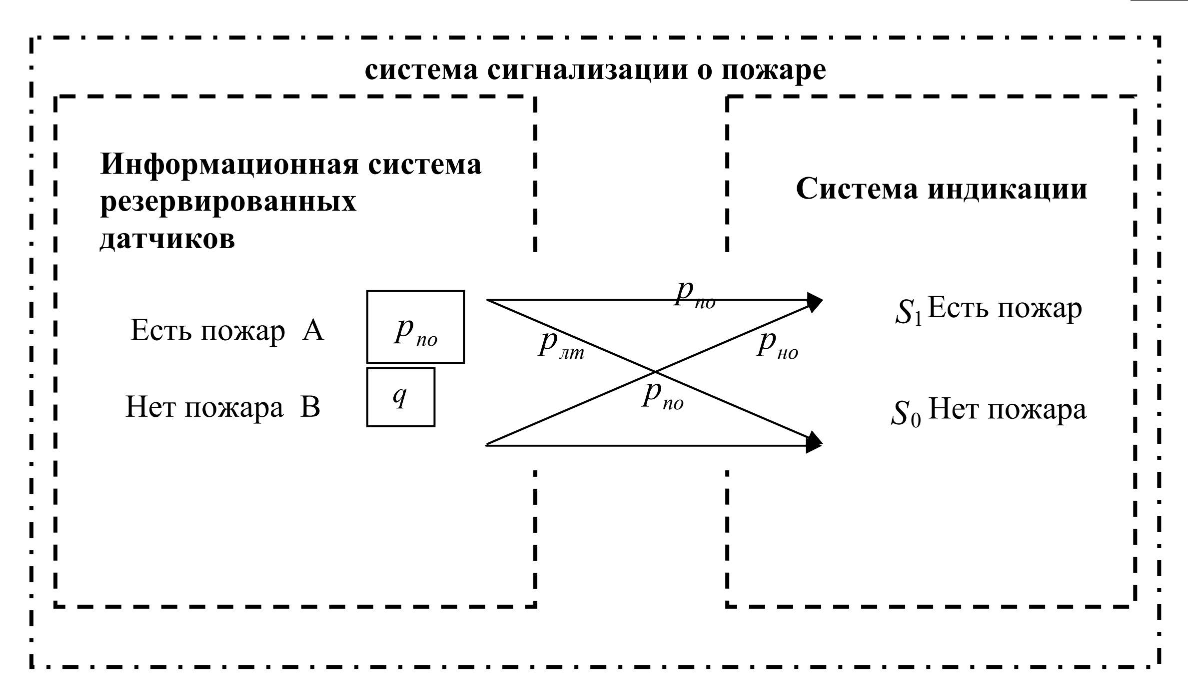


Рисунок 1 – Граф состояний информационно-резервированной системы сигнализации о пожаре

Поскольку исследуемая система пожарной сигнализации совершает ошибки первого рода и второго рода, то будут иметь место дополнительные конструктивные затраты, связанные с этими ошибками, которые можно представить матрицей затрат:

$$З = \begin{vmatrix} 0 & з_{01} \\ з_{10} & 0 \end{vmatrix},$$

где $з_{01}, з_{10}$ – дополнительные конструктивные затраты, связанные с ошибками первого и второго рода соответственно.

Средние дополнительные конструктивные затраты при этом определяются байесовским риском B [4], [5], [7], [8], выраженным как

$$B = p_1 з_{01} p_2 + (1 + p_1) з_{10} p_3 .$$

Учитывая материальные затраты на реализацию системы сигнализации из n резервированных датчиков, определяемые стоимостью C одного датчика и числом n, можно получить окончательное выражение, определяющее средний риск $B(n)$:

$$B(n) = p_1 з_{01} p_2 + (1 + p_1) з_{10} p_3 + C \cdot n . \quad (2)$$

Поскольку сумма первых двух слагаемых в выражении (2) является монотонно-убывающей функцией n (в противном случае нет смысла осуществлять резервирование), а последнее слагаемое того же выражения является монотонно-возростающей функцией n, то функция $B(n)$ имеет глобальный минимум, определяющий оптимальное число n_{opt} резервируемых датчиков.

Поскольку априорная вероятность p_1 возникновения пожара, как правило, является неизвестной, то здесь приемлемо допущение $p = p_1 = 0{,}5$ [8].

Точное определение дополнительных конструктивных затрат $з_{01}$ и $з_{10}$ является достаточно сложной самостоятельной задачей. Исходя из предположения, что для большинства случаев ложная тревога и необнаружение пожара (особенно

«титанового») являются опасными в равной степени, можно в первом приближении принять $З_{01} = З_{10} = З$. С учетом этого выражение (6) можно упростить:

$$B(n) = p_2 + p_3 + C_1 \cdot n, \quad (3)$$

где $C_1 = 2C/З$.

Анализируя выражение (3), можно сделать следующие выводы:

1. Если затраты на создание информационной системы существенно меньше затрат, обусловленных ошибками первого и второго рода, т.е. $C << З$ и больше значений p_2 и p_3 вероятностей ошибок, обусловленных низким качеством датчиков, то величина n_{opt} будет достаточно большой. В этом случае необходимо применить большое число резервированных датчиков низкого качества, чтобы обеспечить малые вероятности ошибок первого и второго рода.

2. Если затраты на создание информационной системы C соизмеримы с конструктивными затратами $З$, что в принципе может быть обусловлено высокой точностью системы и малыми значениями вероятностей p_2 и p_3, то оптимальное число n_{opt} резервированных датчиков, согласно выражению (3), будет небольшим.

Одним из видов резервирования систем является информационное резервирование по принципу мажоритарной логики, согласно которой система сигнализации выдаёт сигнал о пожаре тогда, когда этот сигнал выдают не менее Q датчиков из n. Причём величина Q может изменяться от $[1...n]$. Если $Q = 1$, то схема резервирования имеет вид, изображённый на рис. 2.

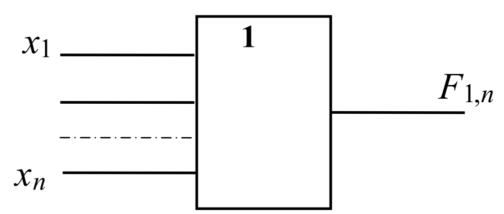


Рисунок 2 – Схема информационного резервирования системы (ИЛИ)

Согласно рис. 2, все n датчиков объединяются по схеме ИЛИ. Сигнал $F_{1,n}$ о пожаре на выходе системы появится тогда, когда сработает хотя бы один датчик из n.

Если $Q = n$, то схема резервирования будет иметь вид, изображённый на рис. 3, на котором все n датчиков объединяются по схеме И.

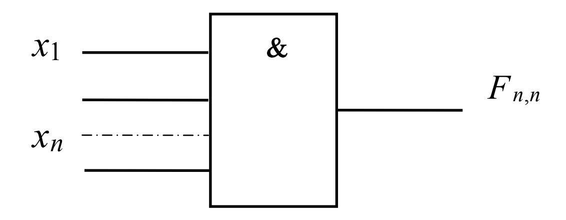


Рисунок 3 – Схема объединения группы датчиков системы первичной информации (И)

Сигнал $F_{n,n}$ о пожаре на выходе этой системы появится тогда, когда сработают все датчики одновременно.

Если Q изменяется в пределах $1 < Q < n$, то схема соединения датчиков имеет вид, изображённый на рис. 4, при котором резервированные датчики группами объединяются по схеме И. Число датчиков в каждой группе равно Q, и каждая

группа датчиков отличается от предыдущей хотя бы одним датчиком. Число таких групп равно числу сочетаний из n по Q, а все эти группы по Q датчиков в каждой объединяются по схеме ИЛИ. Сигнал $F_{Q,n}$ на выходе схемы (рис. 4) появится только тогда, когда будет сигнал на выходе хотя бы одной из групп. Сигнал на выходе каждой группы появляется только тогда, когда есть сигналы от всех датчиков, объединённых в эту группу.

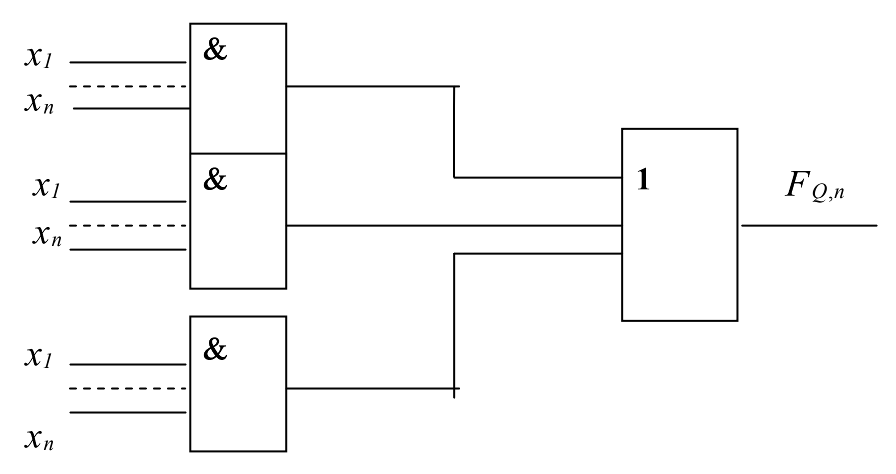


Рисунок 4 – Схема объединения групп датчиков системы первичной информации (И и ИЛИ)

Согласно формуле производящей функцией [4], [5] можно получить зависимости, определяющие значения вероятности p_1, p_2, p_3 в соответствии с мажоритарной логикой на основании триноминального распределения [3]:

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= \sum_{m=0}^{n-Q} C_n^{n-m} \cdot a^{n-m} \sum_{k=0}^{m} C_m^{m-k} \cdot b^{m-k} \mathrm{d}^{\mathrm{k}} + \sum_{m=n-Q+1}^{n-1} C_n^{n-m} \cdot a^{n-m} \sum_{k=0}^{n-Q} C_m^{m-k} \cdot b^{m-k} \mathrm{d}^{\mathrm{k}} \\ P_2 &= \sum_{m=n-Q+1}^{n} C_n^{n-m} \cdot a^{n-m} \sum_{k=n-Q+1}^{m} C_m^{m-k} \cdot b^{m-k} \mathrm{d}^{\mathrm{k}} \\ \mathrm{P}_3 &= \sum_{m=n}^{n} C_n^{n-m} \cdot a^{n-m} \sum_{k=0}^{m-Q} C_m^{m-k} \cdot b^{m-k} \mathrm{d}^{\mathrm{k}} \end{aligned}\right\}. \quad (4)$$

Выражения (4) определяют вероятностные характеристики p_1, p_2, p_3 соответственно для систем резервирования датчиков пожарной сигнализации с мажоритарной логикой. Типовые структурные схемы таких систем резервирования приведены на рис. 2 – рис. 4. Вид такой структурной схемы однозначно определяется параметром Q, который представляет требуемое число датчиков, одновременно «проголосовавших» за наличие пожара. По существу, схема резервирования, изображённая на рис. 4, является универсальной для систем резервирования датчиков по принципу мажоритарной логики. Схемы резервирования, изображённые на рис. 2 и рис. 3, представляют выраженные граничные варианты схемы на рис. 4, когда параметр Q равен 1 или n. Таким образом, когда речь идёт о резервировании по принципу мажоритарной логики, то имеется в виду схема резервирования, изображённая на рис. 4. Отсюда следует, что резервирование по принципу мажоритарной логики не является единственным вариантом, поскольку он не включает в себя все возможные варианты схем резервирования, основанные на комбинации различных способов подключения логических элементов И и ИЛИ.

Поскольку все возможные варианты схемы резервирования, изображённой на рис. 4, однозначно определяются параметром Q, то процесс выбора оптимальной разновидности схемы резервирования на рис. 4. сводится к процедуре определения максимального значения вероятности p_1, определяемой выражением (4), и зависимости от переменной Q, изменяемой в пределах от 1 до n $(Q \le [1...n])$.

Согласно выражениям (4) максимальное значение вероятности p_1 обуславливает минимум функции риска $B(n)$, определяющей эффективность системы резервирования датчиков пожарной сигнализации; зависит не только от числа датчиков n, от их вероятностных характеристик a, b, d, но и от варианта структурной схемы резервирования (рис. 4), определяемого параметром Q.

Для выбора оптимальной структуры информационной системы в смысле минимума параметра Q был разработан алгоритм моделирования. Результаты решения задачи оптимизации в смысле минимизации параметра Q показали, что для любого значения n и для любых значений вероятностных характеристик датчиков a, b, d оптимальным вариантом структуры информационной системы групп резервированных датчиков по принципу мажоритарной логики является схема, изображённая на рис. 4, для которой $Q = 1$ (граничный случай).

Таким образом, объединение резервированных датчиков по схеме ИЛИ (по принципу срабатывания хотя бы одного датчика) является самым лучшим из всех вариантов схем (рис. 4) резервирования датчиков по принципу мажоритарной логики, поскольку вероятность p_1 правильного обнаружения пожара является максимальной для этого варианта при любом числе n датчиков и при любых вероятностных характеристиках датчиков a, b, d.

К сожалению, величина вероятности p_3 (ложная тревога) при $Q = 1$ является также максимальной, хотя байесовский риск $B(n)$ согласно выражению (3) будет при этом иметь минимальное значение, поскольку минимальная сумма первых 2 слагаемых в этом выражении $(p_2 + p_3)$. Последнее утверждение легко показать на основании равенства (3).

Однако нельзя утверждать, что минимум функции (2) риска $B(n)$, определяемый вариантом схемы (рис. 3), является глобальным, поскольку данная схема входит в класс схем (рис. 4) резервирования датчиков по принципу мажоритарной логики, и этот класс схем является только частью множества всех возможных вариантов схем резервирования датчиков, объединяемых посредством всевозможных комбинаций логических схем И и ИЛИ. Существуют и другие способы резервирования датчиков, объединяемых посредством различных комбинаций логических схем И и ИЛИ, в частности, существует принцип последовательного резервирования датчиков, согласно которому, например, в той же схеме (рис. 2) датчики с низкими точностными вероятностными характеристиками a, b, d заменяются комбинациями датчиков, объединяемых посредством логических схем И и ИЛИ. При этом вероятностные характеристики таких комбинаций могут быть лучше и, представляя такие комбинации датчиков как отдельные датчики с более лучшими точностными характеристиками, можно их применять, например, в той же схеме (рис. 4). Таким образом, задача определения оптимальной схемы резервирования датчиков в глобальном смысле требует дополнительных исследований.

Как уже упоминалось, исследуемая оптимальная схема (рис. 4) в смысле резервирования датчиков по принципу мажоритарной логики имеет один существенный недостаток: для этой схемы вероятность ложной тревоги p_3 имеет

также максимальное значение. Уменьшить вероятность p_3 для этой схемы можно двумя способами:

– улучшением точностных вероятностных характеристик a, b, d резервируемых датчиков;

– увеличением числа n резервируемых датчиков.

Вопросы выбора таких оптимальных структур, а также обоснованного обеспечения информационно-управляющих систем сигнализации информационным резервированием являются актуальными при создании и эксплуатации самолетов нового поколения.

Выводы

1. Введенное, таким образом, понятие уровня информационного резервирования представляет собой характеристику качества информационного резервирования, позволяющего производить сравнение систем сигнализации о пожаре, различных по структуре и качеству использованных датчиков.

2. С увеличением уровня информационного резервирования возрастает количество используемых в ССП датчиков, что накладывает на процедуру резервирования дополнительные ограничения конструктивного и экономического плана.

3. Приведенный анализ информационных структур систем сигнализации о пожаре позволяет обоснованно подойти к формированию общей структуры системы, удовлетворяющей требованиям норм технической документации по эксплуатации ВС, и определить рациональные принципы распределения потоков информации между автоматикой и экипажем. Кроме того, данные исследований представляют интерес для локализации особо опасных явлений в производственных процессах.

Литература

1. Аль-Аммори Али. Вероятностный способ обеспечения эффективности информационных систем // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ. – 2006. – Вип. 3. – С. 178-180.
2. Аль-Аммори Али. Исследование влияния реальной технической надежности на эффективность информационного резервирования // Искусственный интеллект. – 2006. – № 4. – С. 660-663.
3. Аль-Аммори Али. Математическая модель параллельного информационного резервирования информационно-управляющих систем воздушных судов // Искусственный интеллект. – 2007. – № 3. – С. 227-238.
4. Абезгаус Т.Т., Тронь А.П. Справочник по вероятностным расчетам. – М.: Воениздат. – 1989. – 656 с.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятности и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
6. Лужецкий В.К. Противопожарная защита самолетов гражданской авиации. – Москва: Транспорт, 1987. – 144 с.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
8. Темников Ф.Е., Афонин В.А., Дмитриев В.И. Теоретические основы информационной техники. – М.: Энергия, 1971. – 410 с.

Аль-Амморі Алі

Методика оцінки інформаційного резервування систем сигналізації небезпечних польотних ситуацій

У статті пропонується узагальнена методика вибору та обґрунтування оптимальної структури паралельного інформаційного резервування систем сигналізації небезпечних польотних ситуацій за принципом мажоритарної логіки. Отримані математичні залежності одночасного обліку та мінімізації ймовірностей помилкових тривог і невиявлення контрольованих подій на борту повітряних суден.

Статья поступила в редакцию 04.01.2008.